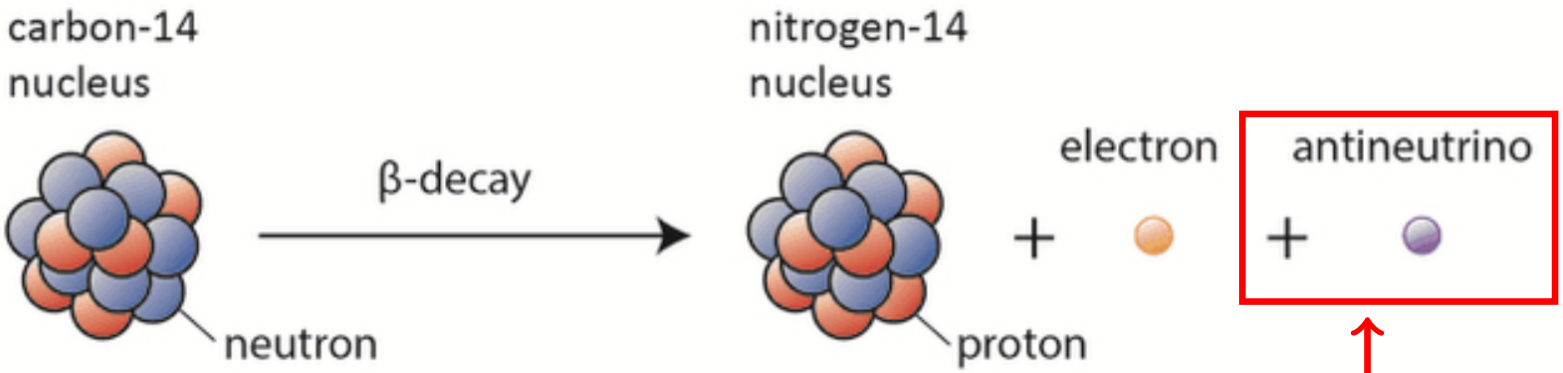
Neutrinos, Dark Matter and Dark Energy

เพชระ ภัทรกิจวานิช
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

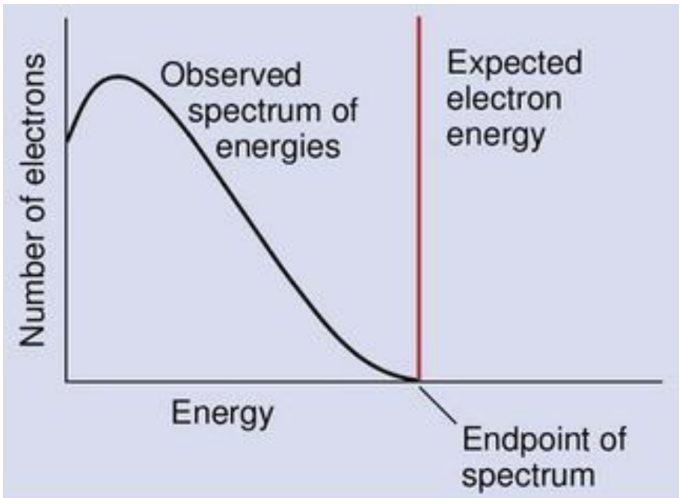
โครงการอบรมฟิสิกส์อนุภาคพื้นฐาน 7 พฤษภาคม 2565

First Hint of Neutrinos

ถ้า beta decay ปล่อยออกมาแค่อิเลกตรอน ทุกตัวควรจะมีพลังงานเท่ากัน
แต่นี่ไม่ใช่สิ่งที่เจอในการทดลอง → Pauli เสนอว่ามีนิวตริโนถูกปล่อยมาด้วย



https://www.radiation-dosimetry.org



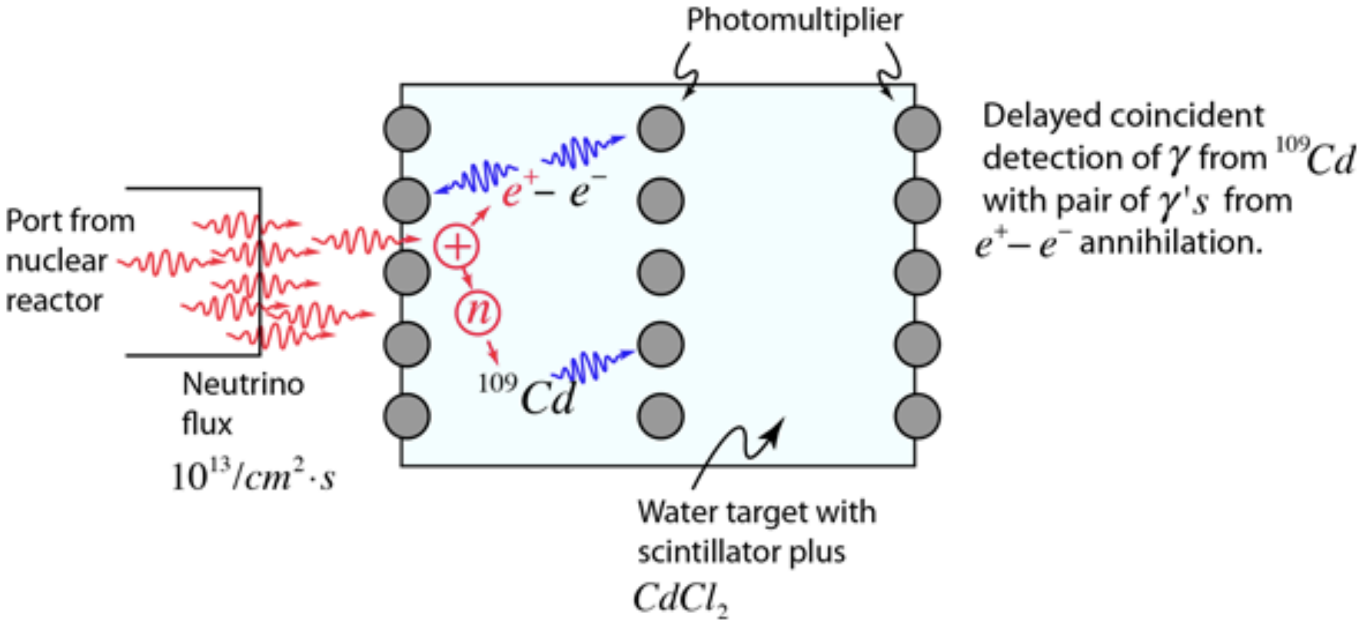
https://andromedageek.wordpress.com

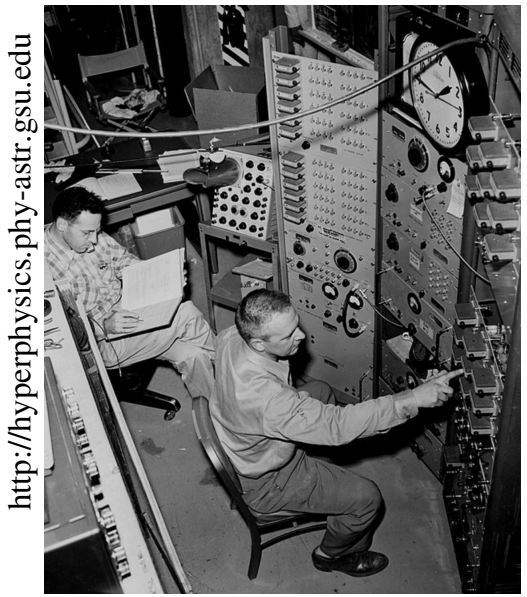
https://en.wikipedia.org

นิวตริโน
- ไม่มีประจุ
- เล็ก ตรวจจับยาก

Detection of Neutrinos (Cowan and Reines Experiment)

Cowan กับ Reines ออกแบบการทดลองเพื่อวัดนิวตริโน (Nobel Prize 1995)





http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

https://en.wikipedia.org

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

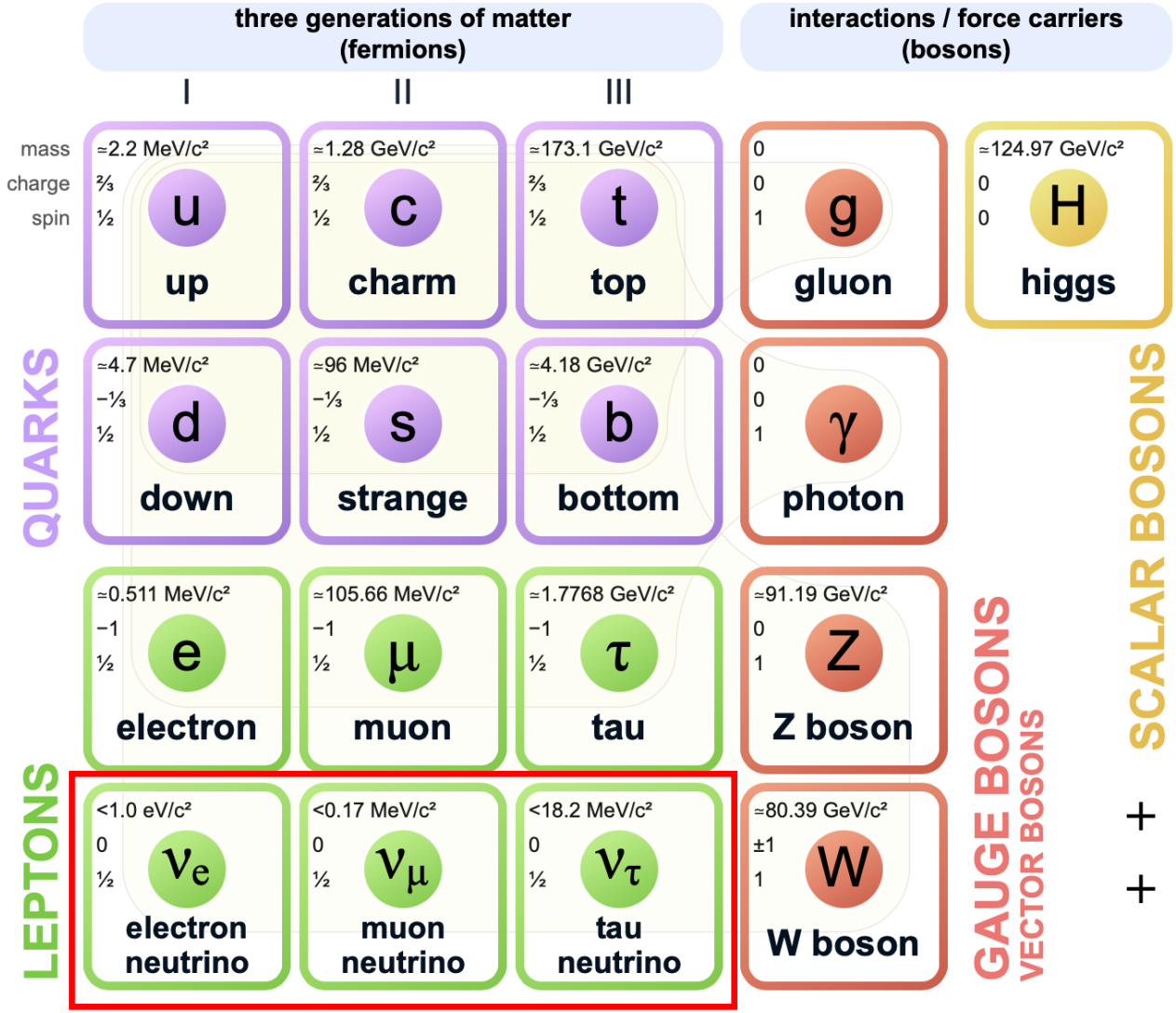
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$n + {}^{108}Cd \rightarrow {}^{109}Cd^* \rightarrow {}^{109}Cd + \gamma$$

$\bar{\nu}_e$ มีสัญญาณเฉพาะ คือรังสีแกมมาสามตัวในเวลาไล่เลี่ยกัน

Neutrinos in Stardard Model of Particle Physics

นิวตริโนเป็น lepton มี 3 species (e, μ, τ) และไม่มีมวล (?)



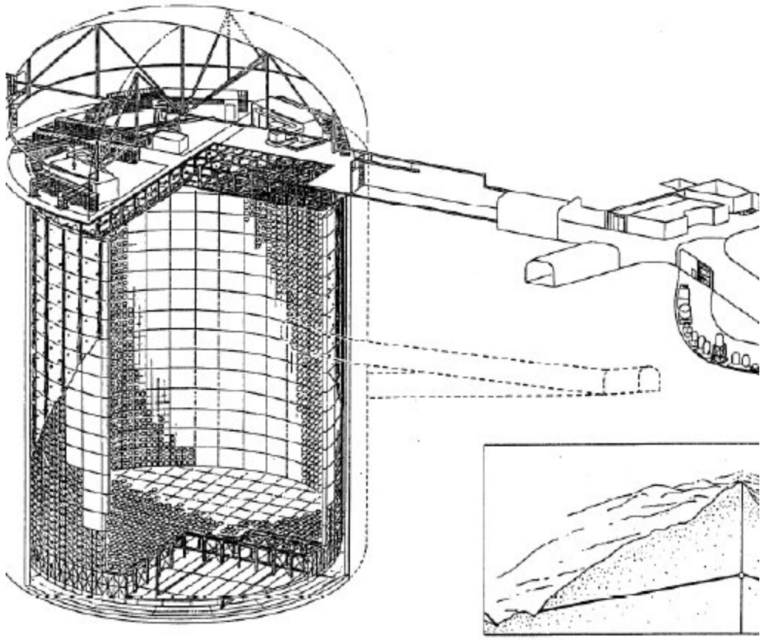
+ antiparticles

+ graviton???

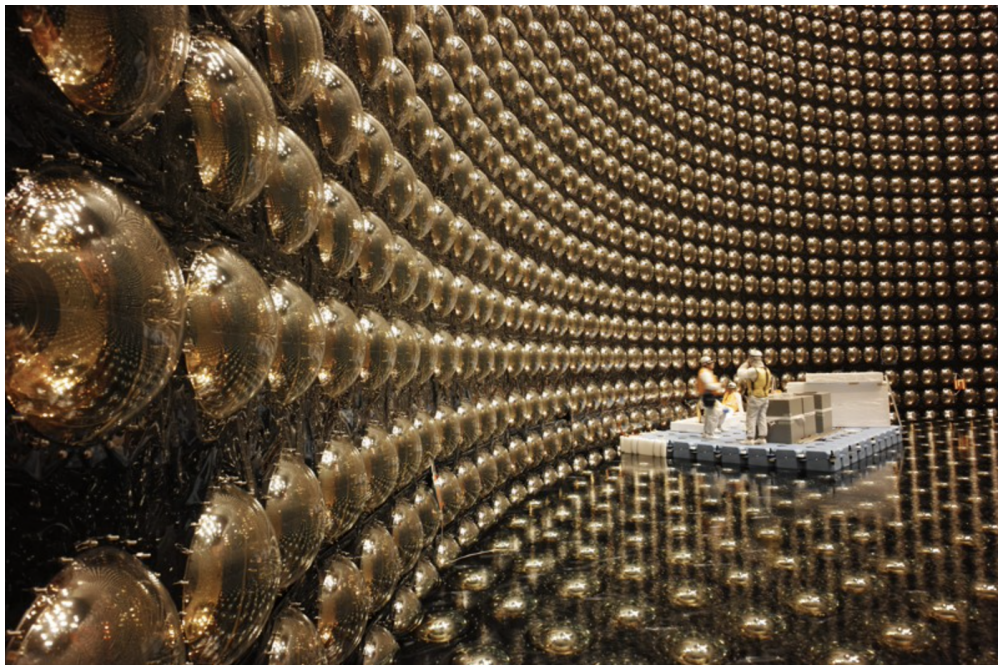
https://en.wikipedia.org

Fun Facts about Neutrinos

- มีนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ทะลุร่างกายเราประมาณพันล้านล้านตัว (10^{15}) ทุกวินาที
- โดยเฉลี่ยแล้วตลอดชั่วชีวิตคนหนึ่งคนจะมีนิวตริโนชนกับอะตอมในร่างกายหนึ่งครั้ง
- นิวตริโนสามารถเคลื่อนที่ในตะกั่วได้เป็นระยะทางหลายปีแสงก่อนที่จะชน



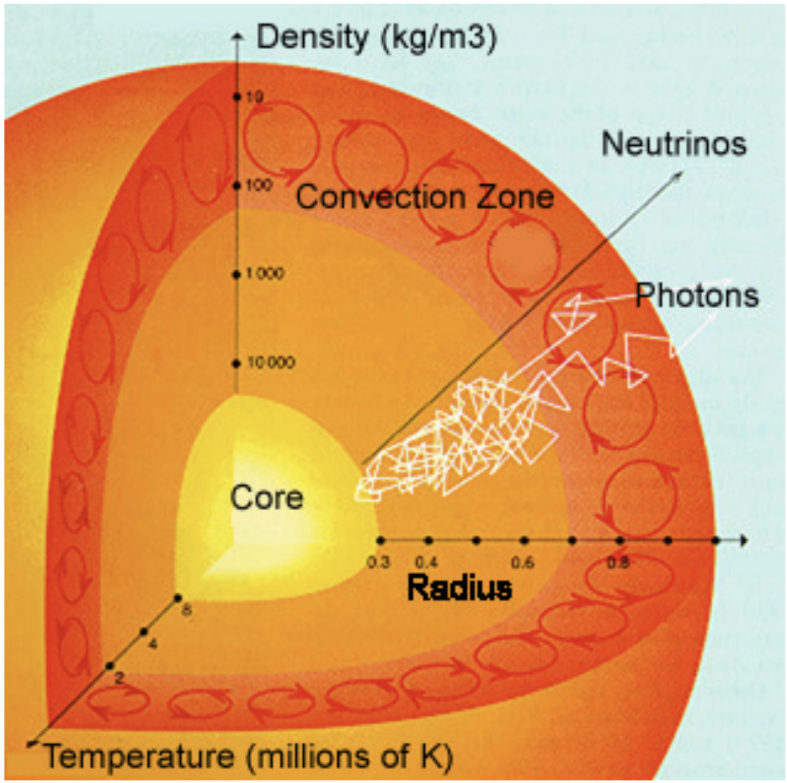
https://www.researchgate.net



https://media.nature.com

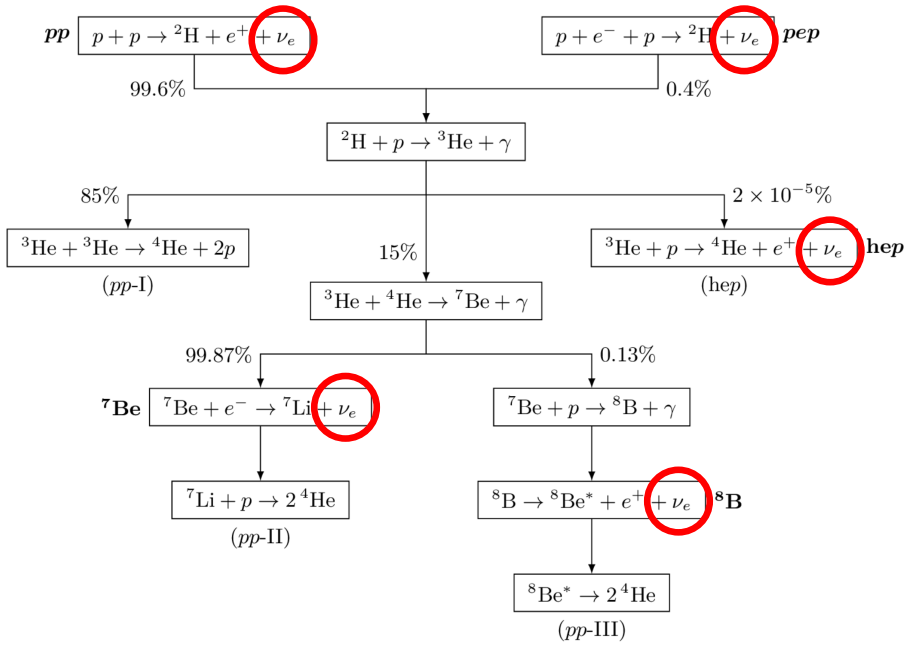
The Solar Neutrino Problem

ปฏิกิริยา nuclear fusion ในดวงอาทิตย์ปล่อย ν_e ออกมา
รู้อัตราการเกิดปฏิกิริยา รู้โครงสร้างภายใน คำนวณได้ว่าควรจะมี ν_e เท่าไหร่
$\rightarrow$ วัดจำนวนนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ แล้วเทียบกับค่าจากทฤษฎี?



https://andromedageek.wordpress.com

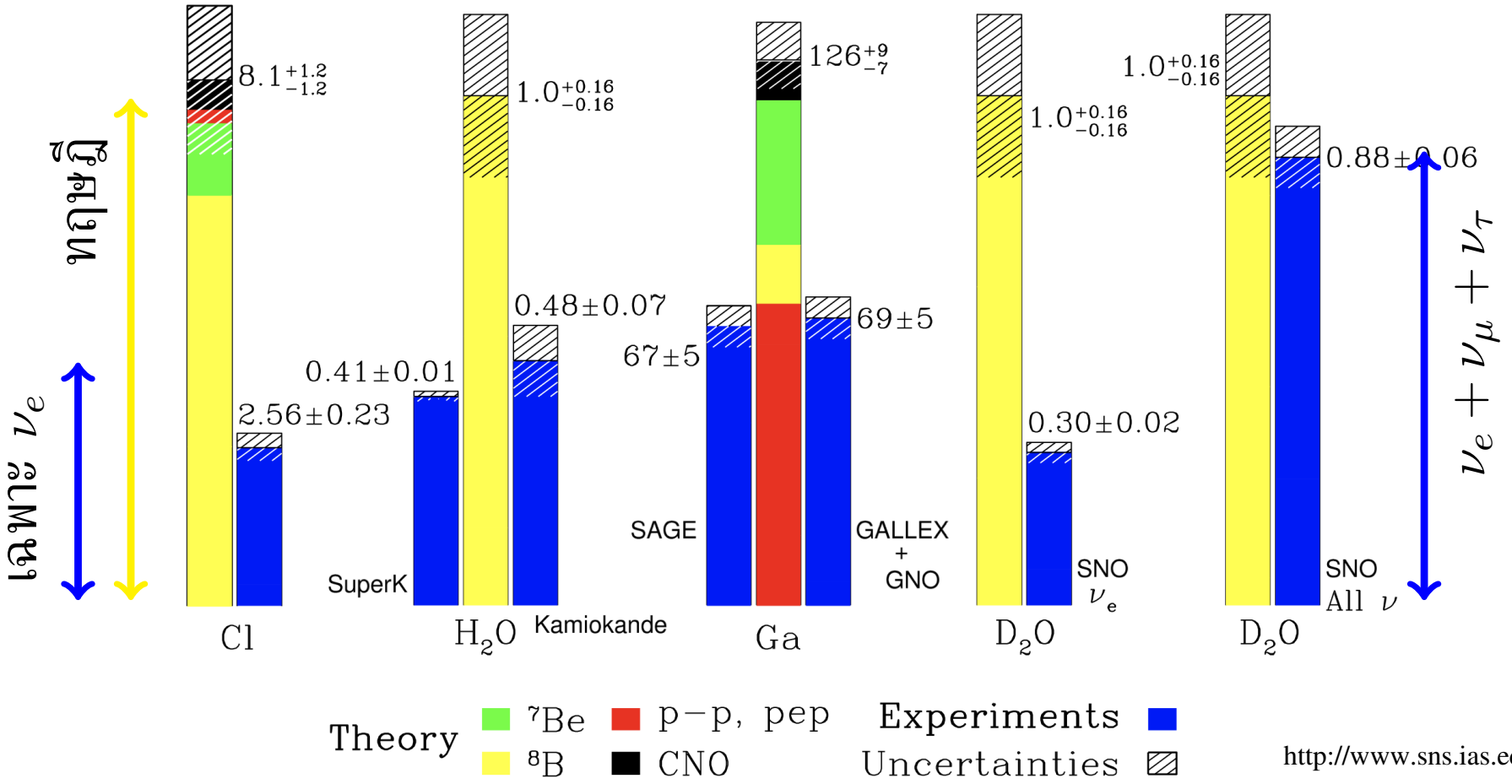
$$4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e + \text{Energy}$$



https://cplberry.com

The Solar Neutrino Problem

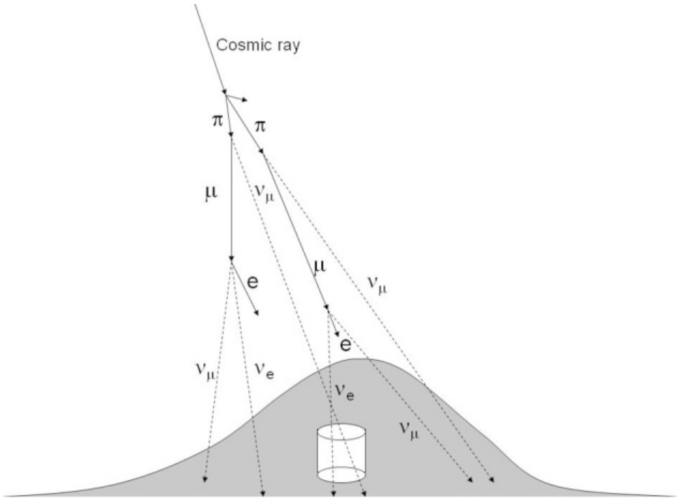
ν_e จากดวงอาทิตย์มีแค่ประมาณ 1/3 ของที่คาดหวังทางทฤษฎี
(แต่ถ้ารวม ν_μ และ ν_τ แล้วจะได้เท่าที่ควรจะมี)
อะไรผิด? (โมเดลของดวงอาทิตย์? เครื่องมือวัด? หรือว่า ν_e หายไปจริง?)



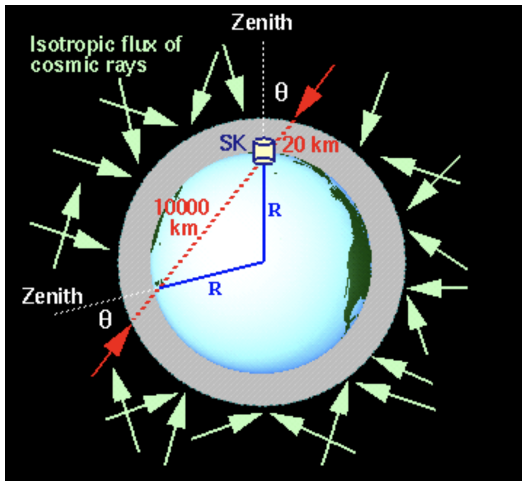
The Atmospheric Neutrino Anomaly

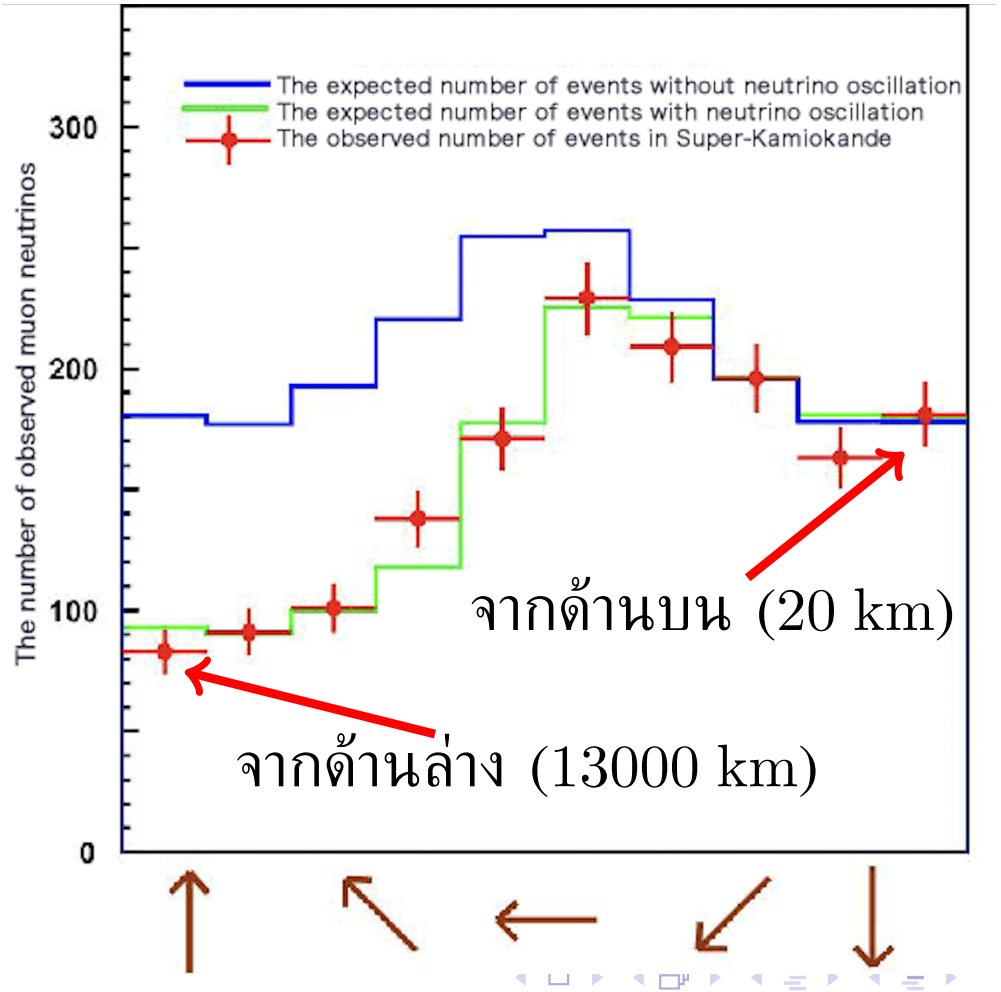
รังสีคอสมิกชนกับอะตอมในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดนิวตริโนด้วย
จำนวน ν_μ ที่มาจากด้านบนกับด้านล่างควรจะเท่ากัน แต่วัดแล้วไม่เท่า ทำไม?

https://neutrinos.fnal.gov



http://hep.bu.edu





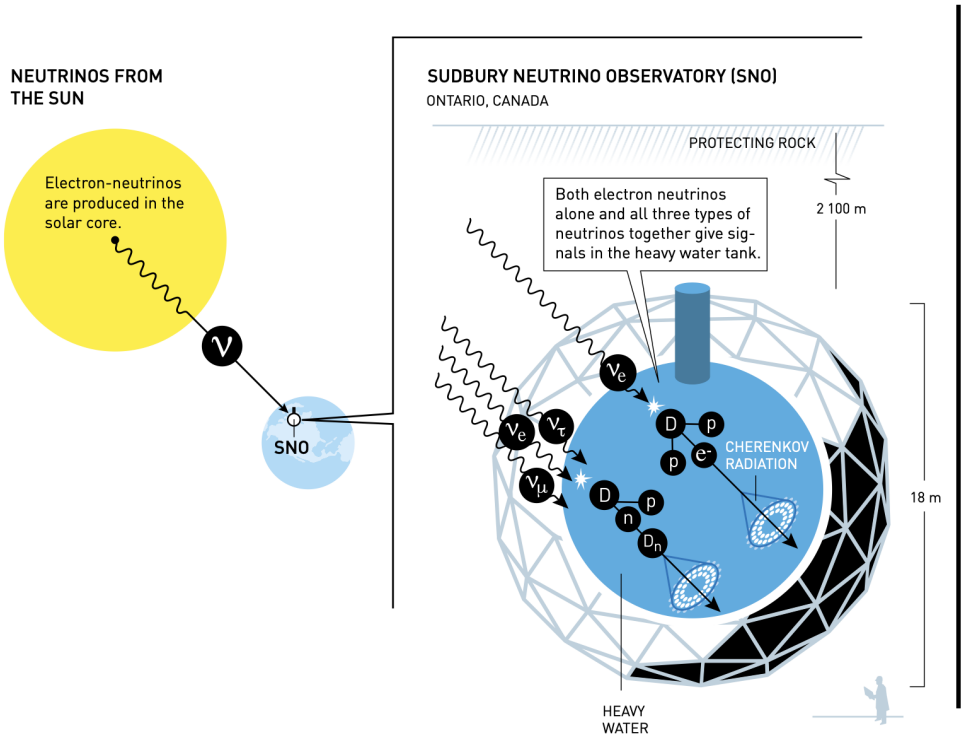
http://www.hyper-k.org

Neutrino Oscillation

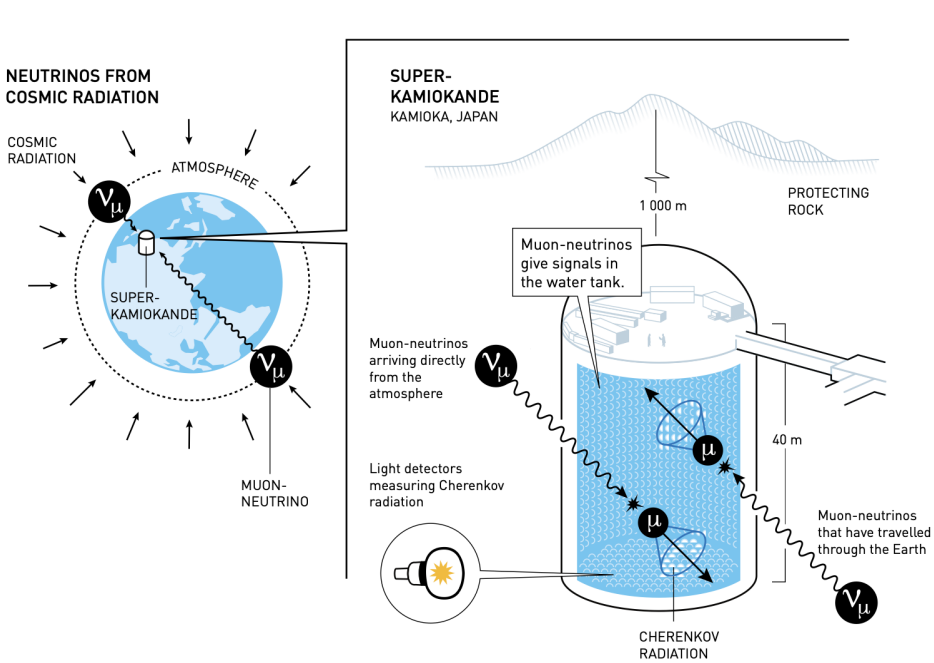
Solar Neutrino Problem: ν_e หายไประหว่างเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์ถึงโลก

Atmospheric Neutrino Anomaly: ν_μ หายไประหว่างเดินทางข้ามโลก

$\rightarrow$ หายไปไหน? หรือว่านิวตริโนจะเปลี่ยนประเภทไปมาได้?



https://www.nobelprize.org



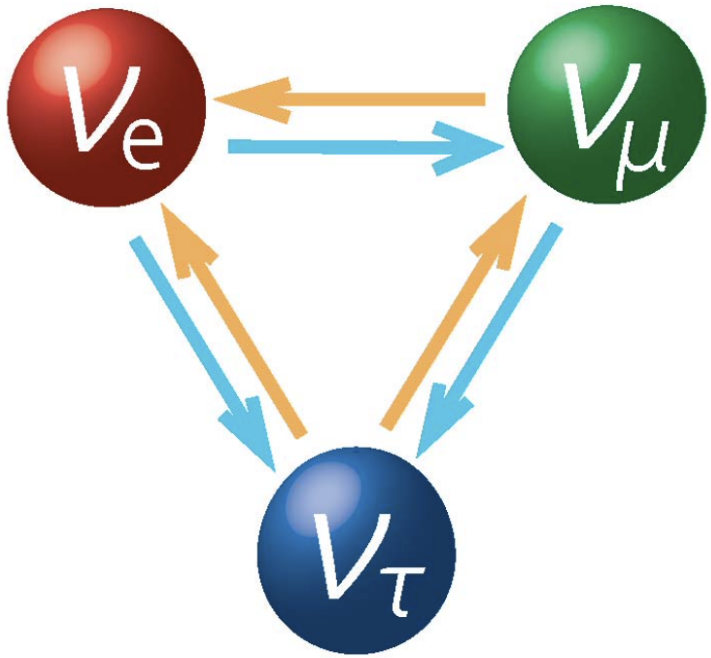
https://www.nobelprize.org

Neutrino Oscillation

นิวตริโนเปลี่ยนประเภทไปมา (ระหว่าง ν_e, ν_μ และ ν_τ) ได้ระหว่างเคลื่อนที่

$\rightarrow$ Neutrino Oscillation (Nobel Prize 2015)

$\rightarrow$ เป็นหลักฐานว่านิวตริโนมีมวล แปลว่า standard model ต้องถูกแก้ไข



https://j-parc.jp

คำถามน่าสนใจช่วงแรก

ถ้าต้องการสร้างเครื่องวัดนิวตริโน ตั้งที่สถานที่แบบใดจึงจะเหมาะสมที่สุด

(a) นอกชั้นบรรยากาศโลก

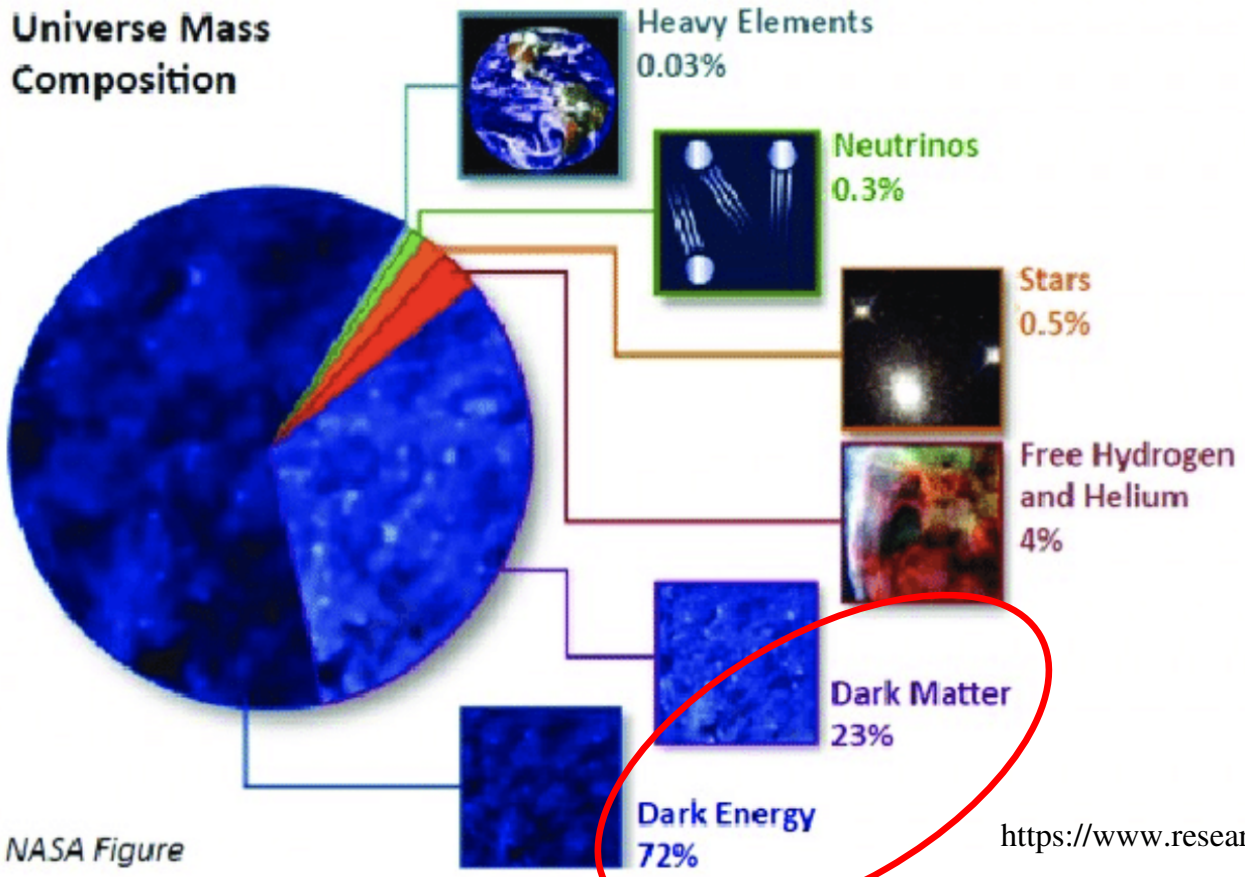
(b) บนภูเขาสูง

(c) ที่ผิวโลกที่ระดับน้ำทะเล

(d) ใต้ผิวโลกลงไปลึกๆ

Dark Matter and Dark Energy

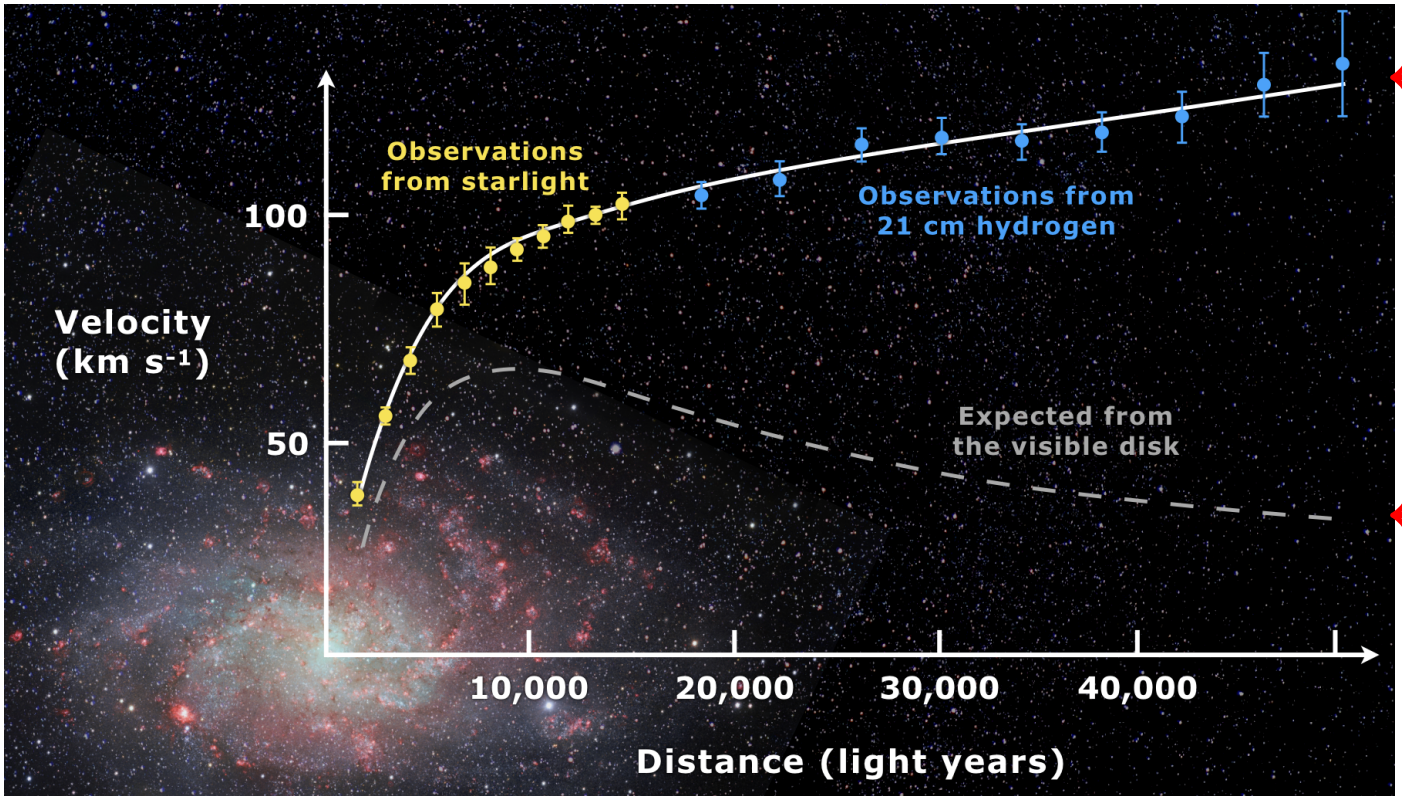
สสารที่เราคุ้นเคย (อะตอม แก๊ส โมเลกุล) เป็นแค่ประมาณ 5% ของเอกภพ
ที่เหลือเป็นสสารมืด (dark matter) และพลังงานมืด (dark energy)
$\rightarrow$ เราไม่รู้ว่า 95% นี้คืออะไร!



https://www.researchgate.net

Evidence for Dark Matter: Rotation Curve of Galaxies

วัดความเร็วโคจรได้จากสเปกตรัม คำนวณได้ว่ามวลที่ให้แรงโน้มถ่วงต้องเป็นเท่าไหร่
พบว่ามวลโน้มถ่วงมีค่ามากกว่ามวลที่เห็น (ในดาวและแก๊ส) ประมาณหกเท่า



ที่วัดได้จริง

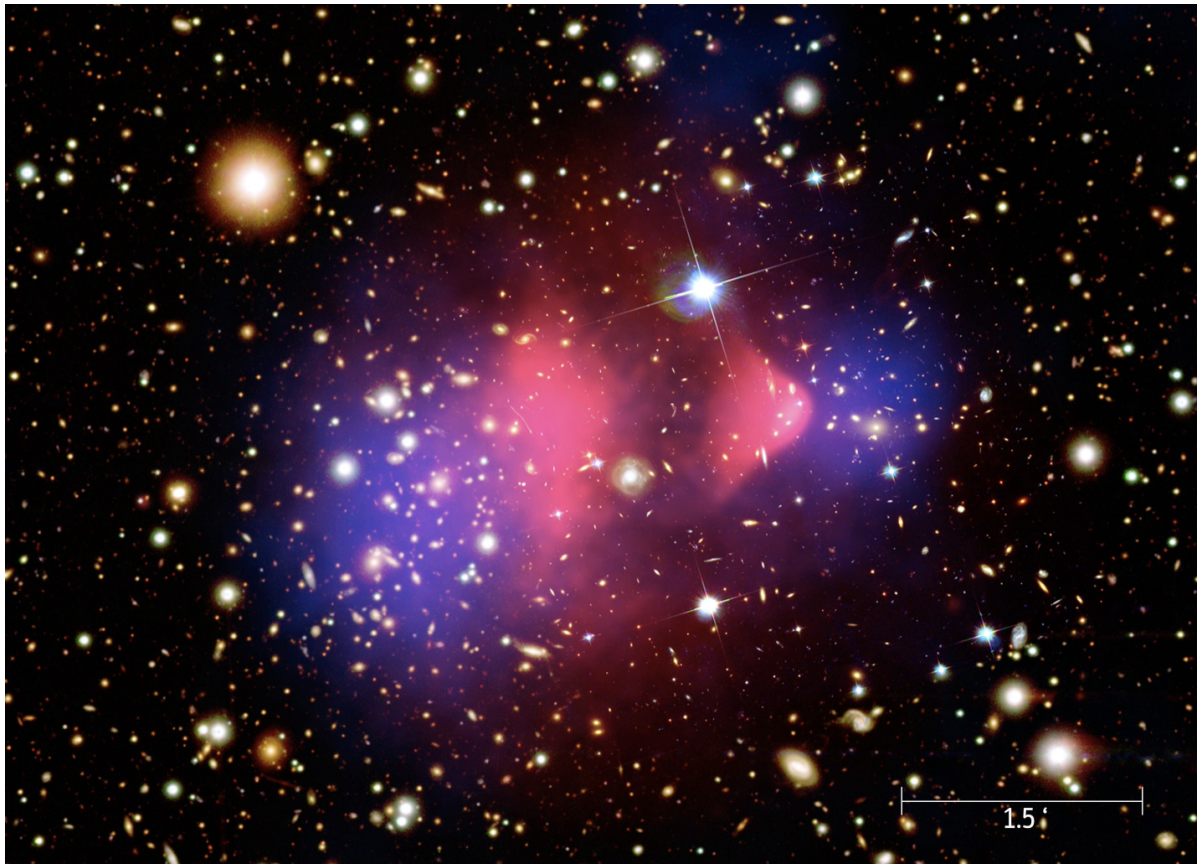
จากสสารที่เห็น
(ดาวและแก๊ส)

https://en.wikipedia.org

→ มีมวลที่มองไม่เห็น!

Evidence for Dark Matter: Bullet Cluster

Bullet cluster เป็น galaxy cluster ที่กำลังชนกัน
มวลแยกออกจากแก๊ส เป็นหลักฐานยืนยันการมีอยู่ของ dark matter ที่ดีที่สุดตอนนี้



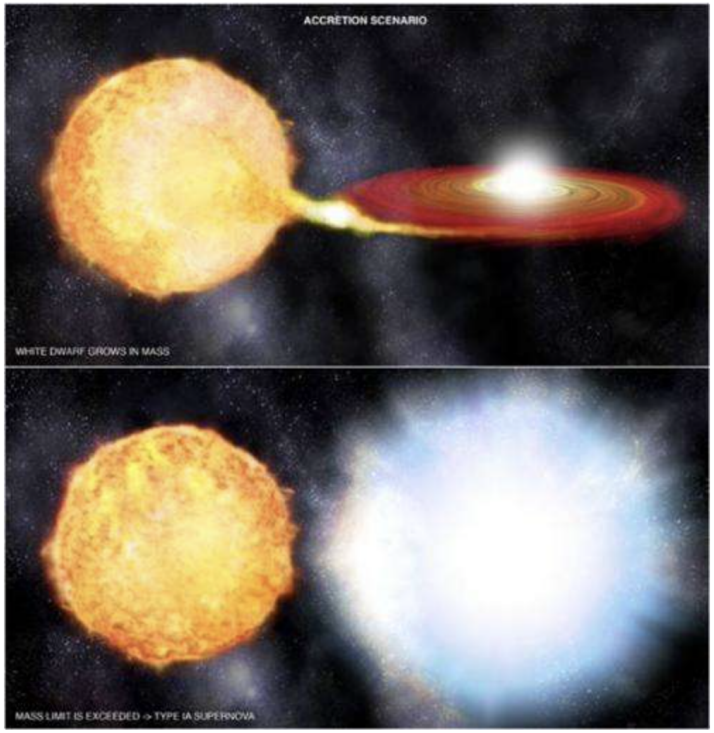
สีชมพู มวลแก๊ส
วัดจากรังสี x-ray

สีน้ำเงิน มวลรวม
วัดจาก gravitational lensing

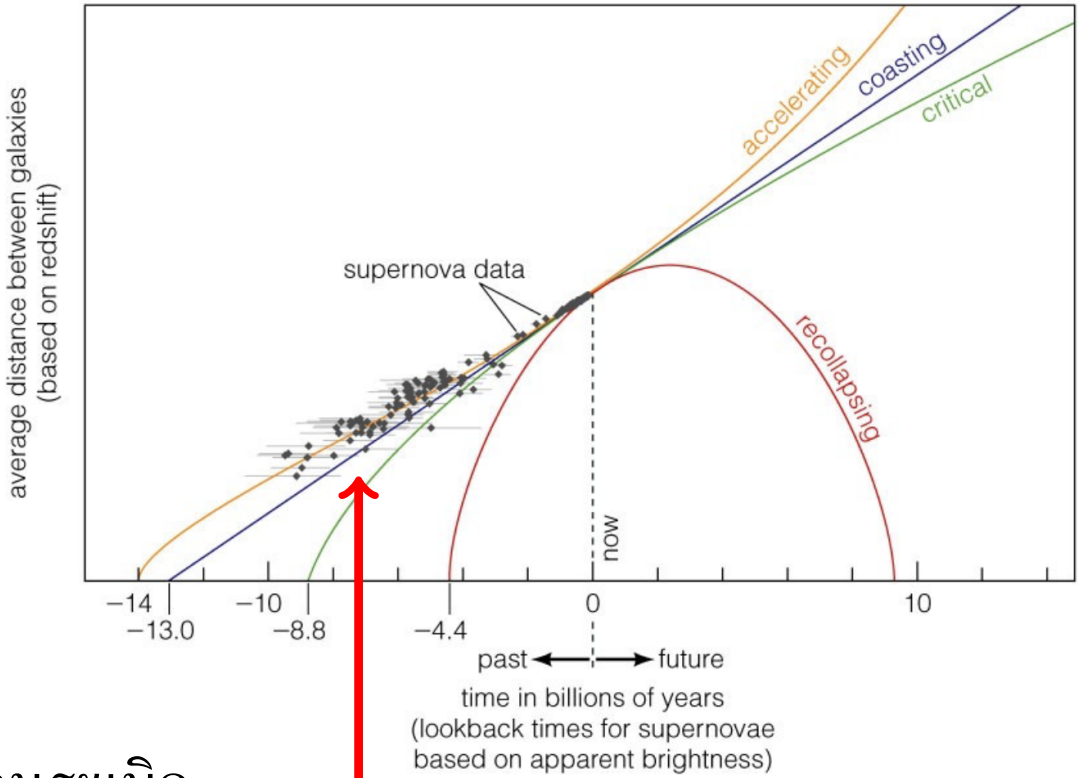
https://en.wikipedia.org

Evidence for Dark Energy: Acceleration of the Universe

Dark energy ทำให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่ง วัดได้จาก supernova type-Ia



https://phys.org



The Cosmic Perspective, Pearson Education Inc. (2006)

SN-Ia คือดาวแคระขาวได้มวลเพิ่มจนระเบิด เป็น standard candle ใช้วัดระยะทางได้

ข้อมูลสอดคล้องกับการขยายตัวแบบมีความเร่ง

Standard Model of Cosmology (ΛCDM)

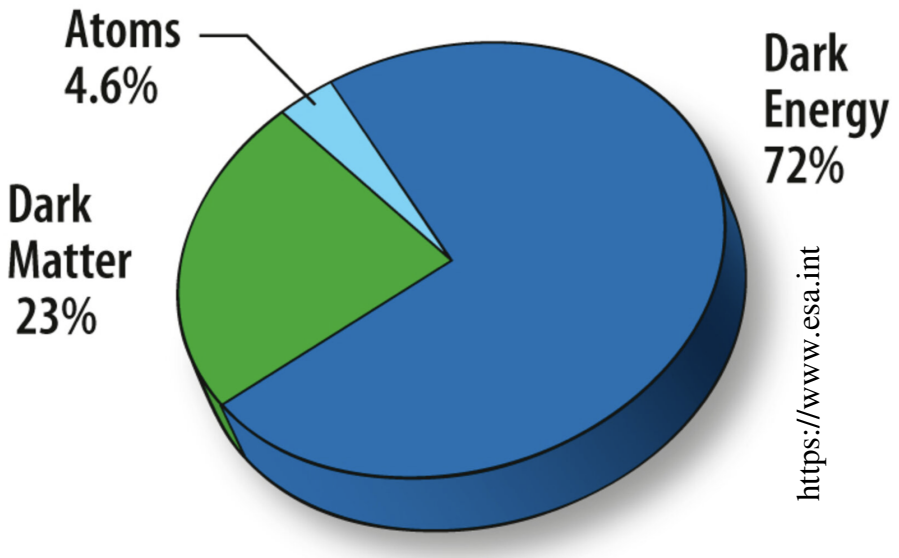
โมเดลเอกภพวิทยาที่ดีที่สุดตอนนี้ มีสมมติฐานหลักๆ สองข้อ

(1) ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปอธิบายแรงโน้มถ่วงและการขยายตัวของเอกภพ

(2) มีสสารมืดและพลังงานมืด (ถึงจะไม่รู้ว่าคืออะไร แต่รู้คุณสมบัติของมัน)

$\rightarrow$ ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลการทดลองและผลการวัดทั้งหมดที่เรามีตอนนี้

precession of Mercury's orbit
rotation curve of spirals
velocity dispersion of ellipticals
gravitational lensing
Bullet cluster
cosmic microwave background
structure formation
Baryon acoustic oscillation
redshift space distortion
Lyman alpha forest
acceleration of the universe
big bang nucleosynthesis



สสารมืดและพลังงานมืดที่จริงคืออะไร
ยังเป็นปัญหาปลายเปิดของฟิสิกส์ต่อไป

คำถามน่าสนใจช่วงที่สอง

สสารประเภทใดที่อาจจะเป็นสสารมืดได้

a นิวตริโน

b หลุมดำขนาดเล็กจำนวนมากที่กระจายอยู่ในเอกภพ

c ปฏิสสาร

d อนุภาคมูลฐานที่อยู่นอก standard model